

УДК 536.24; 621.45.038

Структура течения в пристенной газовой завесе при ее вдуве через круглые отверстия, расположенные в поперечной траншее*

М.А. Пахомов, В.В. Терехов, М.В. Филиппов, И.А. Чохар, К.А. Шаров, В.И. Терехов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mails: pakhomov@ngs.ru, vt@itp.nsc.ru, terekhov@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования локальной структуры осредненного и пульсационного течения в пристенной газовой завесе, вдуваемой через наклонные цилиндрические отверстия вдоль гладкой поверхности, и при организации вдува в поперечную траншею. Измерения локальной структуры пристенной завесы проведены PIV-методом. Вдув вторичного пристенного потока воздуха в основное турбулентное течение приводит к существенной деформации продольной скорости газа для обоих исследованных случаев. При вдуве через отверстия в траншею профиль продольной скорости газа имеет заметно более сглаженный вид без ярко выраженного максимума за сечением выхода из поперечной траншеи. Величины продольной скорости газа в пристенной области имеют меньшее значение в сравнении со вдувом в отсутствие траншеи. Величина поперечной компоненты скорости газа в случае вдува без траншеи больше соответствующей величины при вдуве через отверстия в поперечной траншее после его выхода из траншеи.

Ключевые слова: пристенная газовая завеса, локальная структура течения, эксперимент, вдув через цилиндрические отверстия, траншея, PIV.

Введение

Исследованиями тепловой защиты рабочих поверхностей от воздействия высокотемпературных газовых потоков уже более 70 лет. Тем не менее, несмотря на длительность изучения данной тематики и существование большого числа научных групп, занимающихся решением указанной проблемы, задача тепловой защиты стенки остается актуальной при разработке современных энергетических установок. Для ее решения широко используется газодинамический способ защиты, когда охлаждающий газ (жидкость) вдувается в пограничный слой через защищаемую поверхность или так называемое пленочное охлаждение [1–3]. Для такого способа защиты к настоящему времени хорошо разработана теория однофазных газовых завес в различных термогазодинамических условиях, основы которых изложены в монографиях [1–3] и обобщающих обзорах [4–7]. В этих работах приведено большое количество экспериментальных и расчетных данных и получены полуэмпирические зависимости для расчета параметра тепловой эффективности.

* Результаты измерений получены в рамках проекта РНФ (грант РНФ 19-79-30075); методика PIV-измерений создана и апробирована в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер программы 121031800217-8).

Вдвух через систему наклонных отверстий в защищаемой поверхности наиболее распространен при охлаждении лопаток газовых турбин и стенок камер сгорания. Несмотря на простоту организации такого вдува, этот метод тепловой защиты имеет довольно сложную физику течения, вследствие чего картина течения значительно усложняется и имеет ярко выраженный трехмерный характер [8–10]. В результате взаимодействия вторичной пристенной струи и выходных кромок отверстия со сносимым потоком возникает система когерентных крупномасштабных вихрей: вихри на наветренной (вихрь Кельвина–Гельмгольца, в англоязычной литературе — Windward или Leading Edge Vortex) и подветренной (Leeward Vortex) «сторонах» вихря, парные противовращающиеся вихри (Counter-Rotating Vortex Pair (CRVP) или kidney vortex), подковообразный вихрь, образующийся вокруг вытекающей вторичной струи (Horseshoe Vortex), и вихри в следе, «соединяющие» струю со стенкой (wake vortices).

Большое влияние на структуру течения оказывает отношение массовых скоростей вторичного и основного течений $m = \rho_2 U_2 / \rho_1 U_1$. Здесь ρ — плотность газа, U — его средняя скорость, индексы 1 и 2 соответствуют параметрам основного и вторичного потоков. При малых параметрах вдува ($m < 1$) основной поток накрывает наветренную (переднюю) часть отверстия, поднимается над струей и прижимает струю к стенке, что положительно сказывается на ее тепловой защите. При $m > 1$ основной поток оказывает слабое влияние на вторичное течение и струя сильнее проникает вглубь основного потока, что приводит к заметному снижению тепловой эффективности пристенной завесы и процесс смешения происходит на большем удалении от стенки [8–10]. Также свое влияние на процесс смешения оказывает форма выходного отверстия [11, 12]. Для эллиптических отверстий с расположением большой оси вдоль направления основного течения показано наличие парных противовращающихся вихрей, расположенных примерно на одной линии [12]. Все вышесказанное способствует разрушению пленки охладителя и способствует подосу горячего основного потока к защищаемой рабочей поверхности. Таким образом, существенными недостатками рассматриваемого метода являются неравномерность охлаждения в трансверсальном направлении, наличие защиты рабочей поверхности только в тонкой «полоске» поверхности непосредственно за отверстием вдува, крайне малая протяженность зоны с высокой эффективностью защиты, а также значительное снижение эффективности тепловой защиты при больших параметрах вдува ($m > 1$). Поэтому получение новых данных с целью более глубокого понимания физики крайне сложного процесса смешения основного и вторичного потоков, а также поиск эффективных способов подачи охладителя остается актуальной задачей как с научной, так и с практической точек зрения.

Для улучшения эффективности охлаждения в сравнении с традиционной геометрией отверстий многие предыдущие исследования были сосредоточены на оптимизации формы выходных отверстий и их конфигурации [6, 7]. Одним из эффективных способов, позволяющим получить существенное повышение тепловой защиты стенки, является подача охладителя через наклонные отверстия в поперечную траншею [6]. Основное преимущество указанного метода заключается в том, что смешение вторичного и основного течений происходит по большей части в поперечной траншее. Это приводит к тому, что дискретные струи охладителя в траншее смешиваются с основным потоком и из траншеи вытекает уже «пленка» охладителя, а не отдельные пристенные струи. При этом рабочая поверхность защищается не только непосредственно за отверстиями, но и в трансверсальном направлении.

За последние пятнадцать лет были выполнены серии работ, посвященные экспериментальному [13–16] и численному [17–22] исследованию таких течений. В работе [13] изучалась тепловая эффективность для геометрий с различной шириной траншей, формой их боковых стенок и расстояний до стенок траншей вверх и вниз по потоку. Измерения и численные расчеты влияния ширины и глубины траншеи, формы передней

и задней её стенок на эффективность охлаждения были выполнены с помощью программы CFD пакета программного обеспечения Fluent в работе [14]. Экспериментальные исследования проводились при наличии или отсутствии траншей для различных форм выходной кромки отверстий: обычное круглое отверстие, круглое отверстие в траншее и отверстие фасонного профиля. Было проанализировано влияние форм траншей и задней кромки отверстий на тепловую эффективность. Работа [15] является единственной, где проводились измерения турбулентной структуры течения при вдуве пристенной завесы. Здесь были выполнены измерения поля течения методом LDA и тепловой эффективности с использованием инфракрасной камеры для вдува без траншеи и в поперечную траншею для случая охлаждения модели лопаток газовой турбины. Результаты показали образование второго вихря для случая вдува в траншею в сравнении с базовым случаем вдува без траншеи. Кроме того, уровень интенсивности турбулентности на передней кромке отверстия достигал 50 % для случая траншеи по сравнению с 30 % для базового случая. Было установлено, что наличие траншеи обеспечивает улучшенное общее охлаждение по сравнению со случаем без траншеи. Экспериментальное исследование влияния ускорения и внешней турбулентности на эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности проводилось в работе [16]. Было показано, что ускорение основного потока вызывает снижение тепловой эффективности завесы до 15 %, а его турбулизация увеличивает эффективность до 10 %.

В работе [19] выполнялось численное моделирование вдува через круглое отверстие в траншею с использованием программы CFD пакета ANSYS ICEM. В работе [20] расчет вдува пристенной струи в поперечную траншею был выполнен с использованием трехмерных RANS уравнений, а турбулентность газа моделировалась с применением модели переноса компонент рейнольдсовых напряжений. В работе [21] проводилось численное исследование методом LES структуры течения и тепловых характеристик при вдуве пристенной струи в траншею. Было показано, что вихревая структура течения при вдуве в траншею имеет еще более сложный вид, чем в случае классического вдува через отверстия в защищаемой поверхности. Авторами [22] был выполнен численный анализ структуры течения и тепловой эффективности пристенной газокапельной завесы, вдуваемой через наклонные отверстия в поперечную к потоку траншею. Было приведено сравнение результатов проведенных расчетов с расчетами, полученными с использованием эйлера и лагранжева описаний, и показана применимость обоих подходов для описания динамики и теплообмена двухфазной пристенной струи.

Анализ вышеперечисленных работ позволяет сделать следующие выводы. Экспериментально и численно подтверждается значительное увеличение эффективности пристенной завесы при подаче газа в траншею (до 350 % в сравнении с традиционным вдувом без траншеи), при этом обеспечивается более равномерное покрытие охлаждаемой поверхности. Рост параметра вдува вызывает возрастание теплозащитных свойств завесного охлаждения в сравнении со случаем подачи охладителя без траншеи. Увеличение глубины траншеи усиливает процесс смешения пристенной струи с основным потоком, что приводит к улучшению защитных свойств. В более глубокой траншее наблюдается более интенсивное разрушение крупномасштабных трехмерных структур [13, 14].

Практически все представленные в литературе экспериментальные работы по данной тематике посвящены изучению только тепловой эффективности пристенных завес, за исключением работы [15]. Анализ вышеперечисленных работ показал практически полное отсутствие экспериментальных исследований локальной структуры течения при вдуве вторичного потока охладителя в траншею. При этом очевидно, что именно процесс смешения основного и вторичного течений определяет значительное повышение тепловой эффективности при вдуве пристенной завесы в траншею. Целью настоящей работы является проведение экспериментального исследования процесса смешения при подаче пристенной газовой струи через цилиндрические отверстия в поперечную траншею.

Измерительный стенд

Рабочий участок

Предварительно осушенный и очищенный от примесей атмосферный воздух подавался вентилятором, управляемым частотным регулятором оборотов, в прямоугольный канал с поперечным сечением $1200 \times 150 \times 20$ мм. Длина предвключенного участка $X = 500$ мм ($X/H = 25$). Расход воздуха контролировался цифровым дифференциальным манометром ДМЦ-01М, точность измерения составляла 0,1 Па. Расход воздуха через трубки вдува спутного потока от компрессора устанавливался регулятором массового расхода Bronkhorst EL-FLOW с точностью 0,01 г/с. Средние скорости основного и вторичного потоков в экспериментах были одинаковыми и составляли $U_1 = U_2 = 9$ м/с. Все результаты экспериментов, приведенные в представленной работе, выполнялись для изотермического случая при $T_1 = T_2 = 293$ К и для отношения плотностей вторичного и основного течений $DR = \rho_2/\rho_1 = 1$. Числа Рейнольдса, определенные по параметрам основного и вторичного потоков, составляли соответственно $Re_1 = U_1 H/\nu_1 = 1,2 \cdot 10^4$, $Re_2 = U_2 d/\nu_2 = 1,9 \cdot 10^3$.

Атмосферный воздух для вторичного потока от компрессора через ресивер подавался через три овальных отверстия с малым диаметром $d = 3,2$ мм в рабочий участок. Расстояние между осями отверстий $z = 10$ мм ($z/d = 3,1$). Глубина траншеи $h = 2$ мм, ее ширина $w = 6,4$ мм ($h/w = 0,3$). Центральное отверстие располагалось на оси канала. Для исключения влияния боковых стенок канала на течение, оси крайних отверстий находились от них на расстоянии $Z = 65$ мм ($Z/d = 20,3$). Длина рабочего канала $L = 1200$ мм, его ширина составляла 150 мм и высота $H = 20$ мм. Исследования выполнялись для однорядной системы из трех отверстий, входящих в канал под углом $\alpha = 30^\circ$. Изучались течения для случаев классического вдува вторичного пристенного потока через круглые отверстия без траншеи (рис. 1а) и при наличии поперечной траншеи (см. рис. 1б). Интенсивность турбулентности основного потока на входе в рабочий участок не превышала 2 %. Нижняя стенка рабочего участка выполнена из оргстекла и включает в себя блок с отверстиями для подачи вторичного потока охладителя и адиабатную пластину, имитирующую рабочую поверхность. Длина цилиндрического канала для подачи вторичного двухфазного течения $l = 160$ мм, его относительная длина составляла $l/d = 50$. Расстояние x отсчитывалось от подветренной кромки отверстия или кромки траншеи, а поперечное расстояние z — от центральной линии среднего (второго) отверстия.

Измерительная система PIV

Измерительный комплекс состоит из двумерной PIV (Particle Image Velocimetry) системы «Polis» разработки ИТ СО РАН [23]. Комплекс PIV оснащен импульсным твердотельным Nd:YAG-лазером, производящим парную вспышку, который синхронизован с цифровой камерой JAI PULNIX RM-4200 GE (с матрицей 4 Мпикс) для измерения двумерного поля скорости. Разрешение камеры в экспериментах составляло 17 мкм/пикс. Максимальная энергия излучения составляла 50 мДж, интервал времени между вспышками лазера — до 20 мкс, а их длительность — 5 нс. Комплекс снабжен программным

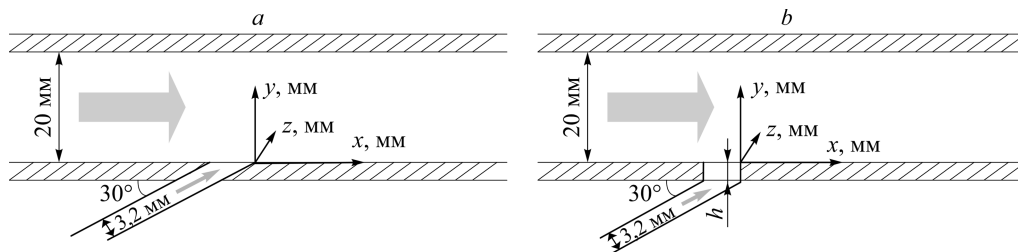


Рис. 1. Схема экспериментального участка без траншеи (a) и с поперечной траншеей (b).

обеспечением σ Flow, позволяющим определять как осредненные характеристики течения, так и статистические моменты второго и более высокого порядков. Для обработки изображений и нахождения скорости в расчетной области использовался кросскорреляционный метод. Для более точного нахождения перемещения применялась попиксельная интерполяция для каждого вектора скорости, фильтрация векторов по отношению сигнал/шум медианным фильтром и интерполяции векторного поля. Для получения поля скоростей изображения разбивались на расчетные области $dx \cdot dy$ и каждая область рассчитывалась отдельно. В экспериментах использовались расчетные области 32×32 пикс с 50 % перекрытием для полей скорости на расстоянии менее 30 мм от места вдува и 64×64 пикс с 75 % перекрытием для расстояний более 30 мм от места вдува. Осреднение осуществлялось по 4000 пар полей мгновенных скоростей.

В качестве светорассеивающих частиц использовался аэрозоль, образующийся при реконденсации паров глицерина. Средний размер частиц аэрозоля составлял 1–1,5 мкм, что позволило получить достоверные данные не только по двум ортогональным компонентам осредненной скорости течения, но и по их пульсационным характеристикам.

Результаты измерений и их анализ

Профили осредненных и турбулентных характеристик пристенных газовых струй

Все измерения структуры течения выполнялись на оси центрального отверстия как для вдува через цилиндрические отверстия без траншеи, так и для вдува в отверстия в траншее глубиной $h = 2$ мм ($h/d = 0,63$). Отметим, что начало координат соответствует задней кромке отверстия и поэтому для первых двух сечений ($x/d = -0,9$ и $-0,3$) приведены данные для течения над отверстием (для случая вдува без траншеи) и в траншее глубиной $h = 2$ мм.

Поперечные профили осредненной продольной U -компоненты скорости в нескольких сечениях по длине канала показаны на рис. 2 (здесь U_{\max} — максимальная осредненная продольная скорость газа в указанном сечении). Вдув вторичного пристенного потока воздуха в основное турбулентное течение приводит к существенной деформации продольной скорости газа для обоих рассматриваемых случаев. Для вдува без траншеи (символы 1) видно наличие ярко выраженной пристенной струи с максимумом скорости, расположенным на некотором расстоянии от нижней стенки канала ($y \approx 2$ мм, $y/H \approx 0,1$). Положение максимума скорости вторичного течения сдвигается от стенки канала в основное течение по мере продвижения вниз по течению, и уже на расстоянии $x/d = 4,4$ заметно, что пристенная струя практически смешалась с основным течением. Для вдува

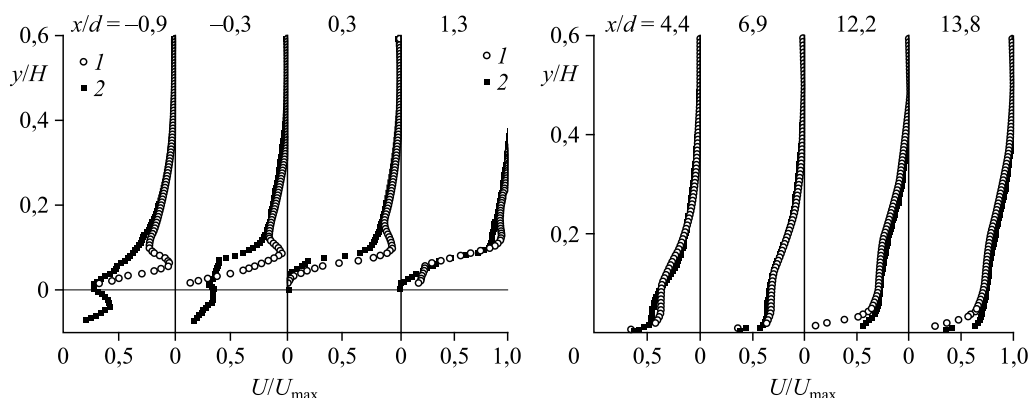


Рис. 2. Профили продольной осредненной скорости по длине канала.

Вдув без траншеи (1) и с траншеей глубиной $h = 2$ мм (2).

через отверстия в траншее (символы 2) профиль скорости газа имеет заметно более сглаженный вид без ярко выраженного максимума за сечением выхода из поперечной траншеи ($x/d = 0,3$). При этом величины продольной скорости газа в пристенной области канала имеют меньшее значение в сравнении со вдувом через наклонные отверстия без траншеи. В самой траншее ($x/d = -0,9$ и $-0,3$) профиль скорости газа имеет локальный максимум. Это объясняется предварительным частичным смешением основного потока в траншее со вторичным течением. Из траншеи вторичный поток вытекает уже не в виде дискретной пристенной струи, а в виде «пленки», которая приводит к заметному улучшению защитных свойств пристенной завесы в трансверсальном направлении [6]. По мере продвижения вниз по потоку отличие в профилях осредненной продольной скорости становится меньше. Пристенная струя смешивается с основным потоком, профиль скорости выравнивается и начинает соответствовать закономерностям развитого течения в плоском канале [1].

На рис. 3 показаны профили поперечной осредненной компоненты скорости V по длине канала. Величина поперечной компоненты скорости в случае без траншеи (1) больше соответствующей величины при вдуве в поперечной траншее (2) после ее выхода из траншеи при $x/d = 0,3 - 1,3$. Далее при ($x/d \geq 4,4$) величины скоростей для обоих исследованных случаев становятся примерно одинаковыми. На расстоянии $x/d = 0,3$ поперечная компонента скорости для вдува без траншеи в два раза выше соответствующего значения для случая вдува в траншею. В первых двух сечениях после выхода пристенной струи из траншеи присутствуют два максимума в распределении поперечной скорости по высоте канала, тогда как для случая вдува без траншеи этого не наблюдается. Нижний максимум в профиле V связан развитием пристенной струи, а верхний обусловлен процессом интенсивного смешения с основным потоком. Далее вниз по течению, начиная с расстояния $x/d = 4,4$, происходит их смыкание, и профиль поперечной скорости имеет один локальный максимум, расположенный в пристенной части канала. Очевидно, что процесс распространения пристенной струи в вертикальном направлении в случае наличия траншеи является менее интенсивным, чем для вторичного потока, вдуваемого через гладкую поверхность. Для случая вдува через отверстия в траншее величина вертикальной компоненты скорости в самой траншее (первые два сечения $x/d = -0,9$ и $-0,3$) значительно выше (почти в два раза) соответствующего значения после выхода струи из нее при $x/d \geq 0,3$. По мере продвижения вниз по потоку величины поперечной скорости значительно уменьшаются в сравнении с первыми сечениями (в несколько раз) и ее максимум располагается в пристенной зоне.

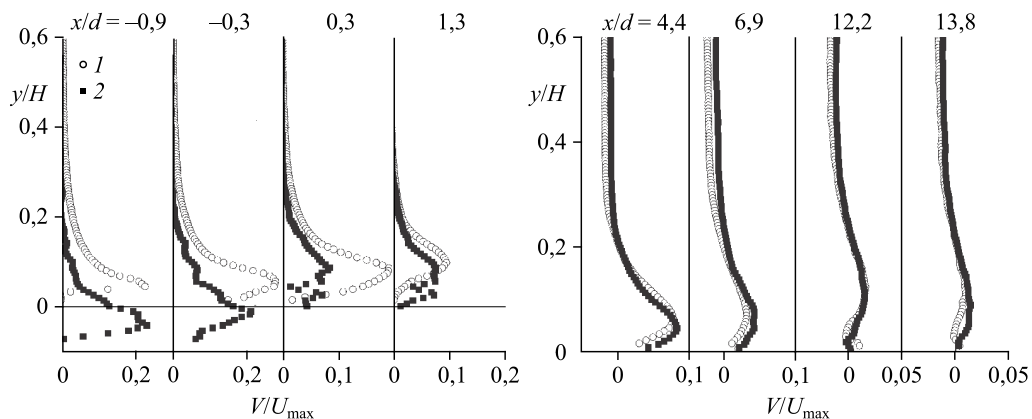


Рис. 3. Профили поперечной осредненной скорости по длине канала. Обозначения см. на рис. 2.

Распределения интенсивности пульсаций продольной (a), поперечной (b) компонент скорости и реинольдсовых напряжений (c) приведены на рис. 4 в нескольких сечениях на ближнем расстоянии от сечения вдува вторичного пристенного потока ($x/d \leq 7$).

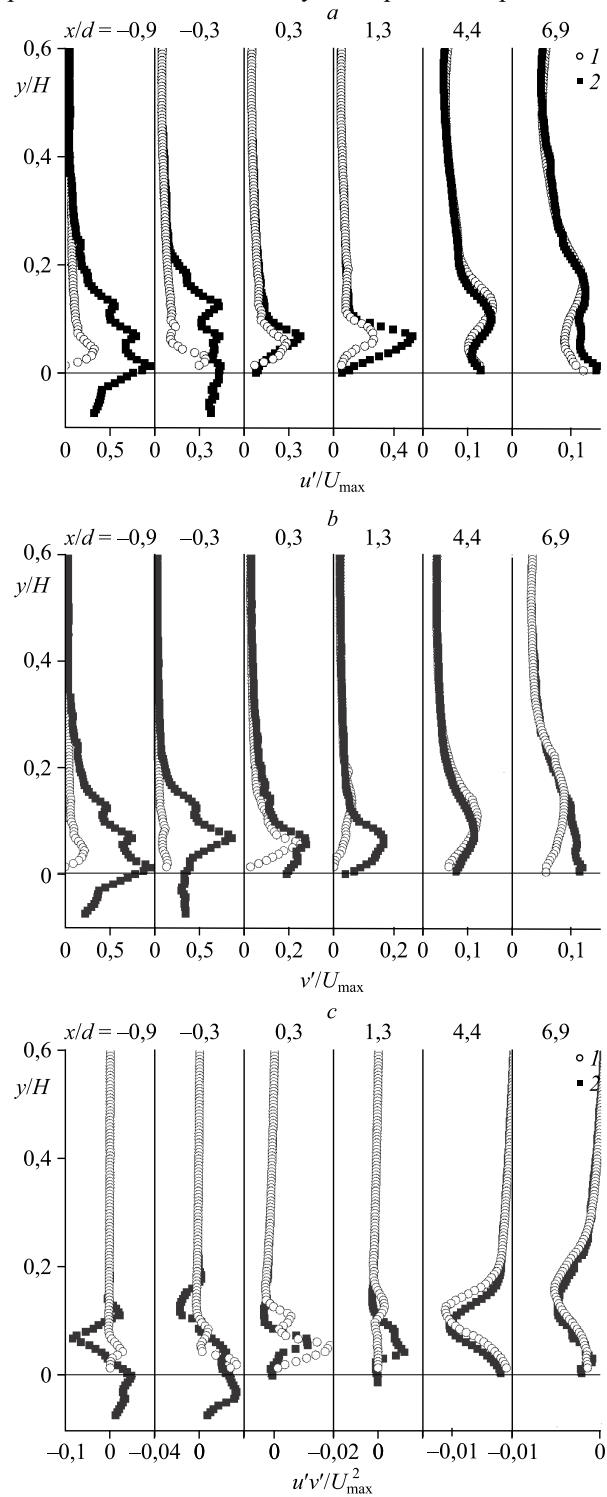


Рис. 4. Профили продольных (a), поперечных (b) пульсаций скорости и реинольдсовых напряжений (c) по длине канала. Обозначения см. на рис. 2.

Сравнение продольных пульсаций скорости для двух случаев вдува (без траншеи и с траншеей) позволяет сделать вывод о том, что в пристенной области за местом вдува вторичного потока наблюдается зона с существенно повышенным уровнем турбулентности $x/d \leq 4,4$ (см. рис. 4а). В случае вдува в поперечную траншею (2) интенсивность продольных пульсаций значительно выше соответствующего значения для вдува без траншеи (почти в два раза). Для сечений, расположенных в районе траншеи, профиль интенсивности продольных пульсаций имеет несколько локальных максимумов, вероятнее всего связанных с особенностями процесса образования сложной вихревой структуры, требующих более детального рассмотрения. Эта тенденция сохраняется и после выхода пристенной струи из траншеи до расстояния $x/d = 1,3$. Интенсивность пульсаций в пристенной области канала заметно превышает (в несколько раз) соответствующее значение для турбулентного ядра течения для обоих случаев вдува пристенной струи. Также в обоих случаях в ядре течения интенсивность турбулентных продольных пульсаций скорости имеет практически одинаковое значение.

При рассмотрении распределений интенсивности поперечных пульсаций скорости (см. рис. 4б) можно видеть, что для случая вдува в поперечную траншею их величина заметно выше соответствующего значения для вдува без траншеи (до нескольких раз) в первых сечениях ($x/d \leq 0,3$), что свидетельствует об интенсивном процессе смешения основного и вторичного течений в траншее. Такой вывод качественно согласуется с данными экспериментов [15]. Далее ($x/d \geq 1,3$) интенсивность поперечных флуктуаций скорости газа существенно уменьшается. Величины уровня поперечных турбулентных пульсаций и форма их профиля по мере удаления от места вдува при $x/d = 4,4$ и $6,9$ для обоих случаев примерно совпадают.

На рис. 4с представлены профили реynольдсовых напряжений. Максимальные уровни реynольдсовых напряжений наблюдаются в пристенной части канала как для случая вдува без траншеи (1), так и для вдува в траншею (2). В ядре течения при $y/H > 0,2$ величины реynольдсовых напряжений для обоих случаев вдува имеют практически нулевые значения. Максимальная величина реynольдсовых напряжений, взятых по модулю, для случая вдува в поперечную траншею в первом сечении при $x/d = -0,9$ (в самой траншее) заметно больше соответствующего значения для вдува без траншеи (практически в два раза).

Визуализация полей осредненных и турбулентных характеристик пристенных газовых завес

Двумерные поля осредненных продольной и поперечной скоростей, интенсивности продольных и поперечных пульсаций скоростей и реynольдсовых напряжений вдоль оси центрального отверстия приведены на рис. 5, только в наиболее интересной нижней части канала, в зоне вдува. Дополнительно на рис. 5а представлены линии тока при отсутствии и наличии поперечной траншеи. Наличие траншеи приводит к заметной деформации линий тока, распределений продольных и поперечных скоростей потока, интенсивности флуктуаций и реynольдсовых напряжений. Структура осредненного течения становится заметно более сложной для течения в траншее в сравнении со случаем вдува пристенной струи без траншеи (см. рис. 5а и 5б). Для вдува без траншеи при небольших параметрах вдува ($m = 1$) характерным является частичное «экранирование» отверстия набегающим основным потоком, что согласуется с выводами обзорной работы [24]. Для вдува в траншею характерным является формирование двух застойных зон. Одна из них расположена в передней части траншеи и занимает примерно половину ее длины и практически всю глубину. Вторая находится непосредственно за задней кромкой траншеи и имеет протяженность почти два диаметра отверстия вдува. Поперечная компонента скорости пристенной струи для случая вдува без траншеи имеет максимальные значения в районе ее вдува, далее она довольно быстро снижается и ее профиль остается достаточно однородным по всему поперечному сечению рабочего канала для обоих случаев. Для случая вдува в траншею максимум скорости наблюдается в области траншеи, где встречаются зоны с отрицательным значением скорости, что, вероятнее всего, свидетельствует о движении потока внутрь траншеи. Здесь максимальное положительное значение поперечной скорости получено около задней стенки траншеи.

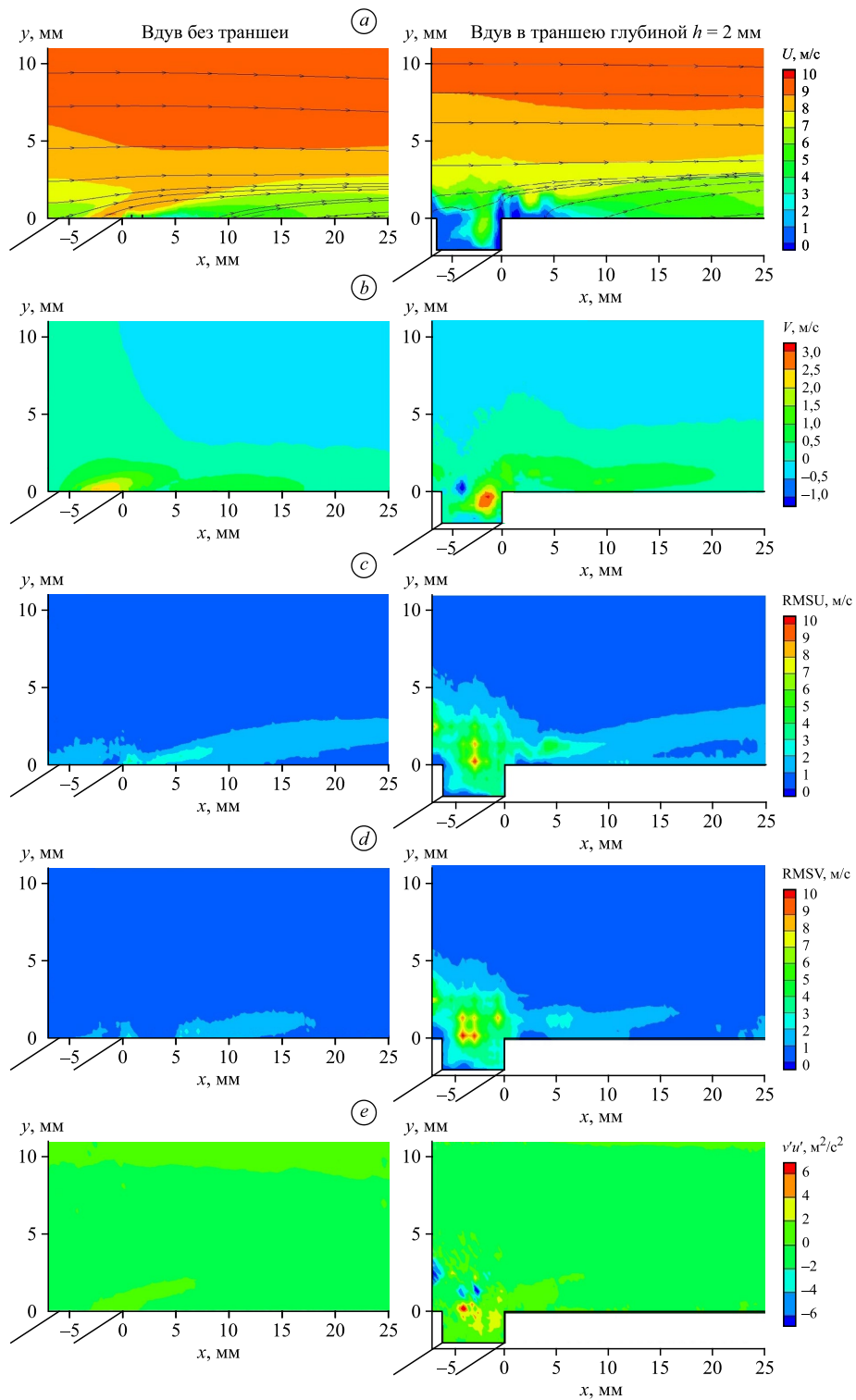


Рис. 5. Поля осредненной продольной (a) и поперечной (b) скоростей, интенсивности продольных (c) и поперечных (d) флуктуаций скорости и реинольдсовых напряжений (e) для случая вдува пристенной струи через цилиндрические отверстия без траншеи (слева) и с траншеей (справа).

Распределения интенсивности продольных и поперечных флуктуация скорости газа для случая вдува без траншеи имеют свои локальные максимумы за задней кромкой отверстия. Далее уровень продольных пульсаций быстро снижается по мере смешения пристенной завесы с основным течением. Для случая вдува с траншеей максимумы пульсаций продольной и поперечной скоростей течения располагаются в самой траншее и на срезе отверстия, что подтверждает выводы авторов, следующие из рис. 2 и 3, о существенно более интенсивном процессе смешения в траншее. Уровни турбулентности в районе траншеи для вдува в поперечную траншею имеют существенно большие значения, чем для вдува без траншеи. При этом эффект от наличия поперечной траншеи имеет большую протяженность по высоте канала (до половины высоты канала для продольных пульсаций и до одной четверти высоты для поперечных). Рейнольдсовы напряжения для вдува без траншеи имеют довольно малые величины, расположенные в области слоев смешения выдуваемой струи с основным потоком. При вдуве в траншею величины рейнольдсовых напряжений значительно увеличиваются (в несколько раз) и их максимальные значения также располагаются в районе поперечной траншеи.

Заключение

В работе представлены данные экспериментального исследования методом PIV локальной структуры течения пристенной газовой завесы, подаваемой через наклонные цилиндрические отверстия вдоль гладкой поверхности и при вдуве в поперечную траншею. Вдув вторичной пристенной струи в основное течение газа приводит к существенной деформации скорости газа в обоих исследованных случаях. При вдуве без траншеи определяется ярко выраженная пристенная струя с максимумом скорости, расположенным на некотором расстоянии от нижней стенки канала. Положение максимума сдвигается от стенки канала по мере продвижения вниз по течению. При вдуве через отверстия в траншее профиль скорости имеет более сглаженный вид и в среднем величины скорости газа в пристенной области канала имеют меньшее значение в сравнении со вдувом через гладкую поверхность. Процесс распространения пристенной струи в вертикальном направлении в случае наличия траншеи является менее интенсивным, чем для вторичного потока, вдуваемого при отсутствии поперечной траншеи. Это свидетельствует о том, что пристенная завеса в случае вдува в траншею является более прижатой к защищаемой поверхности. В случае подачи вторичного потока при наличии поперечной траншеи интенсивность продольных пульсаций значительно выше соответствующего значения для вдува без траншеи (почти в два раза). Интенсивность поперечных пульсаций скорости в случае вдува в поперечную траншею также заметно выше соответствующего значения при вдуве без траншеи (до нескольких раз) в первых сечениях, что говорит об интенсивном процессе смешения основного и вторичного течений в траншее.

Отметим, что для детального понимания сложной трехмерной структуры вихревого течения и процесса смешения при наличии вдува пристенной струи через цилиндрические отверстия в поперечной траншее в основной поток необходимо проведение подробных исследований по изучению структуры потока непосредственно внутри траншеи, что выходит за рамки представленной работы.

Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
2. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
3. Репухов В.М. Теория тепловой защиты стенки вдувом газа. Киев: Наукова думка, 1980. 216 с.
4. Goldstein R.J. Film cooling // *Advance Heat Transfer*. 1971. Vol. 7. P. 321–378.
5. Волчков Э.П., Лебедев В.П., Терехов В.И. Теплообмен в турбулентных пристенных струйных течениях // *Теплофизика и аэромеханика*. 1997. Т. 4, № 2. С. 195–210.

6. **Bunker R.S.** A review of shaped hole turbine film cooling technology // ASME J. Heat Transfer. 2005. Vol. 127. P. 441–453.
7. **Krewinkel R.** A review of gas turbine effusion cooling studies // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2013. Vol. 66. P. 706–722.
8. **Andreopoulos J., Rodi W.** An experimental investigation of jets in crossflow // J. Fluid Mech. 1984. Vol. 138. P. 93–127.
9. **Fric T.F., Roshko A.** Vortical structures in the wake of a transverse jet // J. Fluid Mech. 1994. Vol. 279. P. 1–47.
10. **Гиршович Т.А.** Турбулентные струи в поперечном потоке. М.: Машиностроение, 1993. 251 с.
11. **Haven B.A., Kurosaka M.** Kidney and anti-kidney vortices in crossflow jets // J. Fluid Mech. 1997. Vol. 352. P. 27–64.
12. **New T.H., Lim T.T., Luo S.C.** Elliptic jets in cross flow // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 494. P. 119–140.
13. **Waye S.K., Bogard D.G.** High-resolution film cooling effectiveness measurements of axial holes embedded in a transverse trench with various trench configurations // ASME J. Turbomach. 2007. Vol. 129. P. 294–302.
14. **Lu Y., Dhungel A., Ekkad S.V., Bunker R.S.** Effect of trench width, and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches // ASME J. Turbomach. 2009. Vol. 131. P. 011003-1–011003-13.
15. **Sundaram N., Thole K.A.** Film-cooling flowfields with trenched holes on an endwall // ASME J. Turbomach. 2009. Vol. 131. P. 041007-1–041007-10.
16. **Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Коваленко А.С., Шевцов С.В.** Пленочное охлаждение плоской поверхности однорядной системой наклонных отверстий в траншее: влияние внешней турбулентности и ускорения потока // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 6. С. 731–737.
17. **Islami S.B., Tabrizi S.P.A., Jubran B.A.** Computational investigation of film cooling from trenched holes near the leading edge of a turbineblade // Num. Heat Transfer. Part A. 2007. Vol. 53. P. 308–322.
18. **Oguntade H.I., Andrews G.E., Burns A.D., Derek B., Ingham D.B., Pourkashanian M.** Improved trench film cooling with shaped trench outlets // ASME J. Turbomach. 2013. Vol. 135. P. 021009-1–021009-10.
19. **Lee K.D., Kim K.Y.** Film cooling performance of cylindrical holes embedded in a transverse trench // Num. Heat Transfer. Part A. 2014. Vol. 65. P. 127–143.
20. **Пахомов М.А., Терехов В.И., Халатов А.А., Борисов И.И.** Тепловая эффективность пристенной газовой завесы при ее вдуве через круглые отверстия в траншее // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 343–352.
21. **Hou R., Wen F.B., Luo Y.X., Tang X.L., Wang S.T.** Large eddy simulation of film cooling flow from round and trenched holes // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2019. Vol. 144. P. 118631-1–118631-13.
22. **Пахомов М.А., Терехов В.И.** Структура пристенной газокапельной завесы, вдуваемой через круглые отверстия в поперечную траншею. Сравнение эйлерова и лагранжева подходов // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 3. С. 423–432.
23. **Бильский А.В., Гобызов О.А., Маркович Д.М.** История и тенденции развития метода анемометрии по изображениям частиц для аэродинамического эксперимента (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 1. С. 1–24.
24. **Zhang J.Z., Zhang S.C., Wang C.H., Tan X.M.** Recent advances in film cooling enhancement: a review // Chinese J. Aeronautics. 2020. Vol. 33. P. 1119–1136.

*Статья поступила в редакцию 2 февраля 2021 г.,
после доработки — 5 марта 2021 г.,
принята к публикации 23 марта 2021 г.*